

令和元年6月26日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18159

研究課題名(和文) 堤防破壊確率を用いた破壊危険度の指標化と治水対策優先順位の検討方法

研究課題名(英文) Indexing of levee failure risk and examination method of flood control measures priority

研究代表者

田端 幸輔 (TABATA, KOSUKE)

中央大学・研究開発機構・機構准教授

研究者番号：90756678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：堤防破壊危険確率が治水対策優先順位等の政策意思決定に活用できることが示され、堤防強化対策を早期に実施することが治水安全度向上のために極めて重要であることが明らかとなった。また、Richards式の無次元化と、準二次元浸透流解析手法から、洪水水位、継続時間、堤防幅、堤体透水係数、空隙率の組み合わせによって表される無次元力学指標、堤防脆弱性指標を導出した。現地堤防、模型堤防で発生した決壊及び裏法滑りが、概ね共通の堤防脆弱性指標値によって説明できることが実証された。堤防脆弱性指標が浸透破壊に対する力学的相似条件であることが明らかとなり、長大堤防の破壊危険箇所の一次選定に有効であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本検討で提示した堤防破壊危険確率を用いることで、量的整備(掘削、遊水地等)と質的整備(堤防強化)の相対評価が可能となり、堤防破壊危険確率が治水対策優先順位等の政策意思決定に活用できる可能性がある。また、破壊危険確率と高い相関を持つ無次元力学指標である堤防脆弱性指標は、堤防の浸透破壊に対する本質的理解をもたらし、長大な堤防の破壊危険箇所の一次選定に対して極めて有効である。以上より、本研究成果は、今後の河川整備、堤防管理技術に大いに貢献できる。

研究成果の概要(英文)：It was shown that the levee failure probability can be utilized for policy decision making such as flood control measures priority, and it became clear that early implementation of the levee strengthening measures is extremely important for improving flood control.

In addition, a non-dimensional dynamic index "Levee Vulnerability Index" represented by combination of flood water level, duration time, levee width, permeability and porosity was derived by non-dimensionalizing Richards' equation and quasi two-dimensional seepage flow analysis method. Also, it was proved that the levee breach and slope sliding observed at the field and model levee can be approximately explained by the common levee vulnerability index value. It became clear that the levee vulnerability index is a dynamic similarity condition for seepage failure, and it is shown that it is effective for primary selection of the failure risk point of the long levee.

研究分野：水工学

キーワード：堤防 基盤 準二次元非定常浸透流解析 堤防破壊危険確率 堤防脆弱性指標 治水対策 堤防強化 破堤氾濫リスク

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国では、計画目標流量を計画高水位以下で安全に流下させることを治水計画の基本的な考え方としている。この考え方に基づいて、これまで河道掘削や遊水地整備、築堤等の治水対策が計画、実行されてきた。一方、洪水に対する堤防の安定性については、評価技術が確立されておらず、河川水位が計画高水位を超えると破堤するという仮定の下、河川管理が行われているのが現状である[1]。しかし、我が国の多くの河川は整備途上にあるため、計画規模以下の洪水であっても計画高水位を超え、堤防余裕高部分を通るケースが近年数多く見られる。このため、流下能力のみならず、洪水外力による土堤防の破壊危険性を反映した新しい治水安全度評価法を確立し、これに基づいて実効性の高い治水対策を検討し、流域水害リスクを低減していくことが重要となる[2]。

近年の堤防破壊に関する研究は、破堤メカニズムの解明に着目されたものが主流であり、被災した堤防断面を対象に、土質構成や土質定数の計測値を詳細に与えることによる、FEM や SPH 等の学術的に精緻なモデルを用いたアプローチが多く見られる[3]。しかし、長大な土質構造物である河川堤防は、長年に亘って度重なる築堤が行われてきたことを踏まえると、このような力学的考察だけでは、破壊危険性を精度よく評価することは困難である。

一方、長い治水の歴史をもつオランダをはじめとするヨーロッパ諸国では、近年、信頼性解析法を応用することで、河川堤防を構成する土質材料の不均質性に起因する破堤現象の不確実性を定量的に捉え、破堤リスクを評価する手法が採用されている[4]。しかし、ヨーロッパでは想定する洪水継続時間が十分長く、定常状態を仮定した破壊基準式が用いられており、非定常性の強い洪水を外力とする我が国の河川堤防に諸外国の手法を用いることは適切ではない。国内においても、信頼性解析により堤防破壊確率を検討した研究が行われてきているが[5]、得られた堤防土質データ数に限りがあったことから、堤防の破壊確率を縦断的に捉えた検討がなされていない。また、堤防の信頼性解析には、更なる検討が必要であることが指摘されている。

このように、堤防の破壊確率を推定するには多くの課題があるが、近年、河道の水面形時間変化の観測データの活用等、洪水流解析技術が向上していること[6]、一級河川における堤防ボーリングデータから得られた土質定数の基礎データが数多く集められ、データベース化されてきたことから[7]、申請者は、洪水流解析と、堤防土質データに基づいた信頼性解析によって、堤体浸透、裏法滑りに対する破壊確率を算出し、長大な土堤防の破壊危険箇所を縦断的に把握する方法を提示した[8,9]。この手法を、近年超過洪水を経験した信濃川下流と梯川に適用し、堤防の破壊確率縦断分布を算出し、縦断的に透水係数が大きい箇所において、浸透による破壊確率が大きく算出されることを明らかにした(図-1 参照)。また、浸透が生じやすい箇所では裏法滑りの発生確率も同様に大きくなり、浸潤線の上昇によって滑り破壊の危険性が高くなることを確認している。

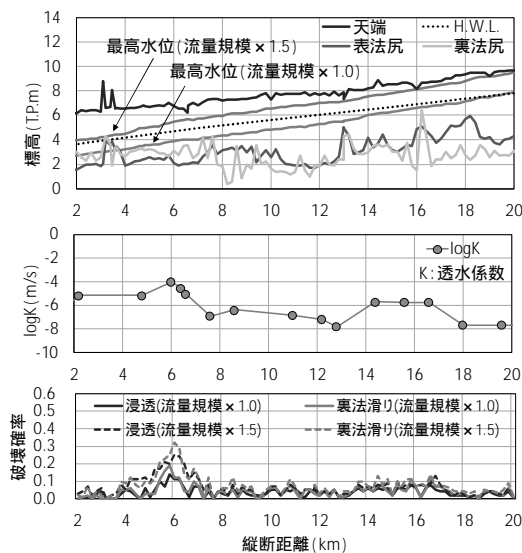


図-1 土質定数と堤防破壊確率の縦断分布 (信濃川下流 H23.7 洪水, 左岸堤防の例)

申請者の解析では、膨大な試行回数を必要とするモンテカルロ法を用いた信頼性解析の効率化のため、堤体内の浸潤線の計算には、不透水性地盤上の堤体を仮定した非定常浸潤線の近似式(内田の式[10])を適用しており、これを透水性地盤上の堤体浸透にも適用可能となるように拡張する必要がある。また、これまでに堤防の破壊確率縦断分布算定法を用いた検討事例が少なく、算出される破壊確率の絶対値が持つ工学的意味については十分明らかになっていない。これらの課題をクリアするとともに、堤防破壊確率に基づいた河道システム全体の治水安全度評価法を確立し、効果的な治水対策と整備優先順位の検討、堤防余裕高部分を考慮した破堤氾濫リスクの評価へと展開していく必要がある。

[1]国土交通省(2005) 治水経済調査マニュアル(案), [2]福岡捷二(2015) 今後の河川防災・減災について, 河川, [3]前田健一(2013) 陥没やパイピングにおける細粒分のダイナミクスと破壊の連鎖のシミュレーションの試み, 第48回地盤工学研究発表会, [4]国土交通省国土技術政策総合研究所(2012) 米英蘭の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策に関する事例調査, [5]本城(2012) 信頼性解析法の河川堤防への適用 - 問題点の整理 -, 国土技術研究センター堤防委員会基調講演, [6]福岡捷二(2014) 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, [7]河川堤防の土質試験結果情報(2014), 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室 HP, [8]田端幸輔, 福岡捷二, 瀬崎智之(2015) 超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), [9]田端幸輔, 福岡捷二(2014) 大規模洪水時における堤防の浸透, 裏法滑りによる破壊確率の評価法に関する研究, 第二回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, [10]内田茂男(1952) 自由境界を有する非定常浸透流について, 土木学会誌.

## 2. 研究の目的

洪水外力が増大傾向にある我が国にとって, 実効性の高い治水対策を行い, 流域水害リスクを低減させることは極めて重要な課題である. このためには, 流下能力を主軸とした従来の考え方に加え, 危機管理として洪水時の堤防破壊危険性を考慮に入れた河道の治水安全度の評価技術が求められる. これまで申請者は, 堤防のポーリングデータを用いて堤防の破壊確率を定量化することで, 長大土堤防の破壊危険箇所の推定を可能とした. 本研究では, 算定される堤防破壊確率と 堤防土質や断面諸元等の実データから見た破堤危険箇所との対応関係を分析し, 破壊確率の値の工学的意味を明らかにする. そして, 堤防破壊確率を指標とした治水安全度評価法を開発し, 実河川流域の河道整備・管理技術へ応用することを目的としている.

## 3. 研究の方法

### (1) 堤体基礎の透過・不透過条件を考慮可能な堤体内非定常浸透流の近似解法の開発

不透水性基礎地盤上の堤体内非定常浸透線の近似解である内田の式[10]を発展させ, 透水性基礎地盤内への鉛直浸透を考慮可能な, より一般性の高い堤体内非定常浸透流の解析法を開発する. 具体的には, 堤体内と基盤層内の浸透流の挙動を準二次元的に捉え, Darcy 則と連続条件を解くことで, 河川水位, 洪水継続時間, 堤体と基盤の透水係数・空隙率, 基盤層厚さ, 堤体幅の物理量を反映可能な解析手法を検討する.

### (2) 堤防破壊確率による河道の治水安全度評価と治水対策優先順位の検討

河道水位を下げる対策, 堤防の質的整備に関する対策を対象とする. 前者については, 河道掘削, 遊水池整備をそれぞれ実施した場合の堤防前面の水位ハイドログラフを縦断的に算出し, これを境界条件として堤防破壊確率を算出する. 後者については, 前腹付けとドレーン工を対象とし, (1)の考え方を応用して堤防強化実施時の堤体内浸透線低下を表現できる準二次元浸透流解析法を開発する. そして, 河道掘削, 遊水池整備, 堤防強化の整備順序を変化させ, 堤防破壊確率を算定し, どの順序が最も効率的に破壊確率を下げるのできるのかを検討する.

### (3) 堤防余裕高部分を使って洪水が流下する場合の破堤氾濫リスクの検討

様々な規模の洪水外力に対して堤防余裕高部分の破壊確率を算出し, 洪水外力の生起確率で積分することで, これまで評価されてこなかった堤防余裕高部分を流れた場合の堤防破壊リスクを縦断的に算出する. 上記検討結果と, 計画高水位で破堤するとした従来手法により求めた結果との違いを分析する.

### (4) 堤防破壊確率値が持つ工学的意味の解明に向けた検討(無次元力学指標: 堤防脆弱性指標の提示)

近年大規模洪水を経験し, 堤防基礎データが存在する一級河川を対象に, 浸透・裏法滑りに対する破壊確率を求める. 堤体内浸透流の解析には(1)で開発する手法を適用する. 算定した破壊確率が, 堤体浸透に伴う被災箇所を説明できることを確認する. また, 膨大な試行回数を必要とする破壊危険確率を算定せずとも, 洪水外力, 河道特性, 堤防断面, 土質特性等から堤防破壊危険性を表現できる新たな指標「堤防脆弱性指標」を提示し, 指標と破壊危険確率との対応関係や, 指標の持つ工学的意味について考察する.

## 4. 研究成果

本研究で得られた主要な成果を以下に示す.

(1) 堤体直下の基盤が透水性である場合, 堤体に浸透した水の一部が基盤層に抜け出ることにより堤体内浸透線が低下し, 堤防脆弱性指標が減少することを表現できる準二次元非定常浸透流解析手法を新たに開発した<sup>3)</sup>.

(2) 上記手法をさらに拡張し, 堤防強化対策として前腹付け, ドレーン工設置時の堤体内浸透線の解析手法を開発した. これにより, 堤防強化対策による破壊危険確率軽減量を定量的に評価できることが確認された<sup>3)</sup>.

(3) 堤防破壊危険確率を用いることで, 量的整備(掘削, 遊水池等)と質的整備(堤防強化)の相対評価が可能となり, 堤防破壊危険確率が治水対策優先順位等の政策意思決定に活用できる可能性があることが示された. また, 堤防強化対策を早期に実施することが治水安全度向上のために極めて重要であることが明らかとなった.

(4) 堤防破壊危険確率を洪水生起確率で積分することで、破堤氾濫リスクを縦断的に算出した。堤防破壊危険確率は、水位だけでなく洪水継続時間、堤体・基盤の透水性、堤体の土質強度、断面形状によって縦断的に変化するため、計画高水位で決壊とした場合（すなわち流下能力のみによる評価）に比べて、堤防決壊リスクの縦断特性がより科学的に分析可能となることが確認された。

(5) 洪水水位、継続時間、堤防幅、堤体透水係数、空隙率の組み合わせによって表される無次元量である「堤防脆弱性指標」(図-2)を次元解析により導出し<sup>2)4)</sup>、この値が堤防破壊危険確率と高い相関(図-3)を持つことを明らかにした<sup>8)</sup>。更に、一般的な浸透流の支配方程式であるRichards式の無次元化、ならびに申請者の提案した準二次元浸透流解析手法からも、堤防脆弱性指標が導出可能であることが確認された<sup>1)</sup>。このことから、堤防脆弱性指標は、形状や土質構造の異なる堤防の浸透破壊現象に対する力学的相似条件であることが示された。

(6) 現地堤防、模型堤防で発生した決壊及び裏法滑りが、概ね共通の堤防脆弱性指標値によって説明できることを、現地及び模型堤防データに基づいて実証した<sup>2)5)6)7)</sup>。具体的には、堤防脆弱性指標が0.01~0.1で裏法滑り、0.1~1.0で堤防決壊が生じる傾向にあることが確認された。以上より、無次元力学指標である堤防脆弱性指標は、堤防の浸透破壊に対する本質的理解をもたらし、長大な堤防の破壊危険箇所の一次選定に対して有効であることが示された。

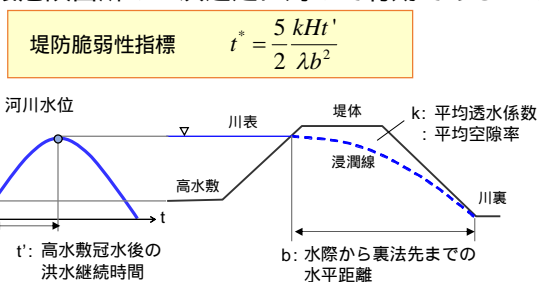


図-2 堤防脆弱性指標

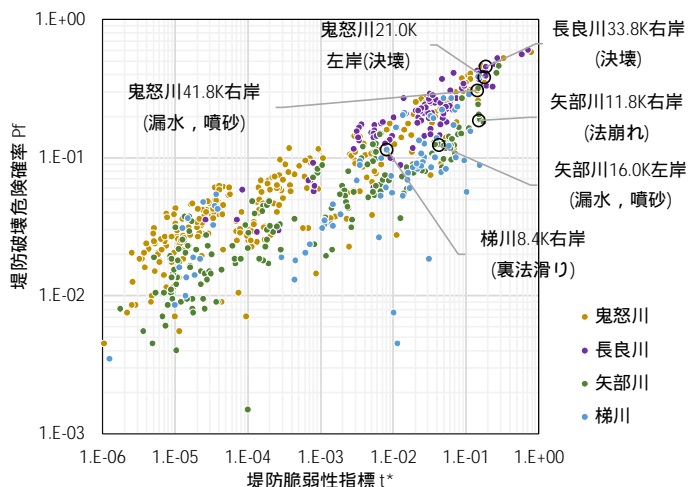


図-3 堤防破壊確率と堤防脆弱性指標の関係

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

- 1) 福岡捷二, 田端幸輔: 浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学的相似条件 - 浸透流ナンバー-SFn と堤防脆弱性指標  $t^*$ , 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74 No.5 pp.I\_1435-I\_1440, 2018. (査読付き)
- 2) 田端幸輔, 福岡捷二, 内堀寿美男, 上村勇太: 堤防脆弱性指標に基づいた堤防破壊危険性評価に関する研究 —鬼怒川中下流部平成27年9月大洪水を例として—, 河川技術論文集, 第23巻, pp.387-392, 2017. (査読付き)
- 3) 福岡捷二, 田端幸輔: 堤体基礎地盤の透水性・堤防強化対策を考慮した堤体内非定常浸潤線解析法の開発と堤防破壊危険確率の低減効果の見積りに関する研究, 河川技術論文集, 第22巻, pp.261-266, 2016. (査読付き)

### 〔学会発表〕(計5件)

- 4) 福岡捷二, 小高猛司, 田端幸輔: 現地堤防と模型堤防の浸透破壊を規定する力学的相似条件 - 堤防脆弱性指標, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.79-82, 2017.
- 5) 田端幸輔, 福岡捷二: 堤防脆弱性指標を用いた堤防浸透破壊危険性評価に関する研究, 第72回年次学術講演会, 2017.

- 6) 上村勇太・福岡捷二・田端幸輔：平成 27 年 9 月鬼怒川大洪水時における堤体浸透被害と透水性基盤を考慮した堤防脆弱性指標  $t^*m$  との関係，第 72 回年次学術講演会，2017．
- 7) 上村勇太・福岡捷二・田端幸輔：鬼怒川中下流部の平成 27 年 9 月大洪水時における堤防被災と堤防脆弱性指標の関係に関する考察，第 44 回関東支部技術研究発表会，2017．
- 8) 福岡捷二，田端幸輔：堤防破壊危険確率と堤防脆弱性指標に基づく堤防破壊危険タイムラインを用いた被災プロセスの見える化，第 4 回河川堤防技術シンポジウム講演概要集，pp.61-pp.64，2016．

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6．研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。